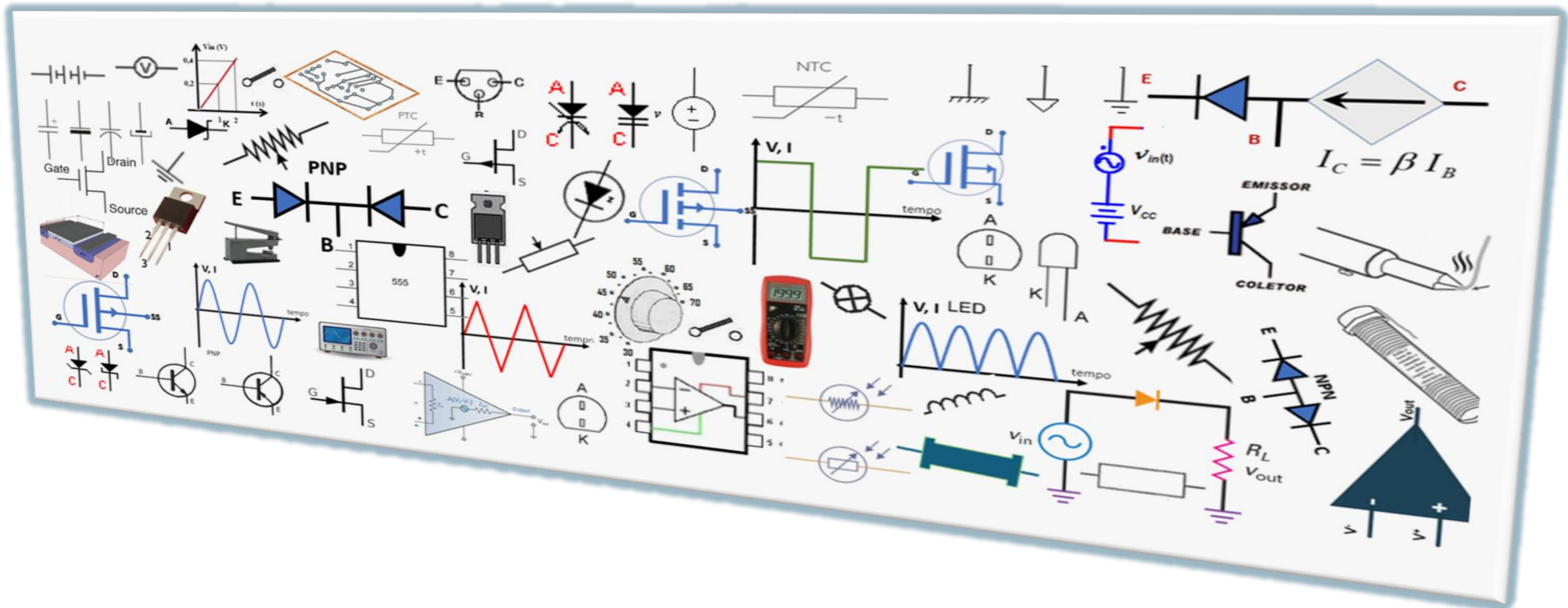
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ – CAMPUS CURITIBA
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA - DAELT
Amplificadores Operacionais e Semicondutores – ELT74E
Prof.ª Elisabete Nakoneczny Moraes

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA

UTFPR
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CAMPUS CURITIBA

OPERAÇÃO DO DIODO SEMICONDUTOR E O MODELO MATEMÁTICO

AOS01- OPERAÇÃO EM POLARIZAÇÃO DIRETA E REVERSA, MODELO MATEMÁTICO E A CURVA CARACTERÍSTICA



Curitiba, 2 de outubro de 2024.

AGENDA

1. Dúvidas a respeito da teoria e laboratório
2. Operação diodo semicondutor
    1. Polarização direta
    2. Polarização reversa
3. Modelo matemático

Acessos web

Link para moodle Teoria Eletrônica
https://moodle.utfpr.edu.br/course/view.php?id=1823

Link para moodle do laboratório
https://moodle.utfpr.edu.br/course/view.php?id=13348

Contato com a professora:
elisanm@utfpr.edu.br

Link para participar do grupo de whats da teoria de Eletrônica:

https://chat.whatsapp.com/B5nHvKwN1Ed4f67jrdzYXE



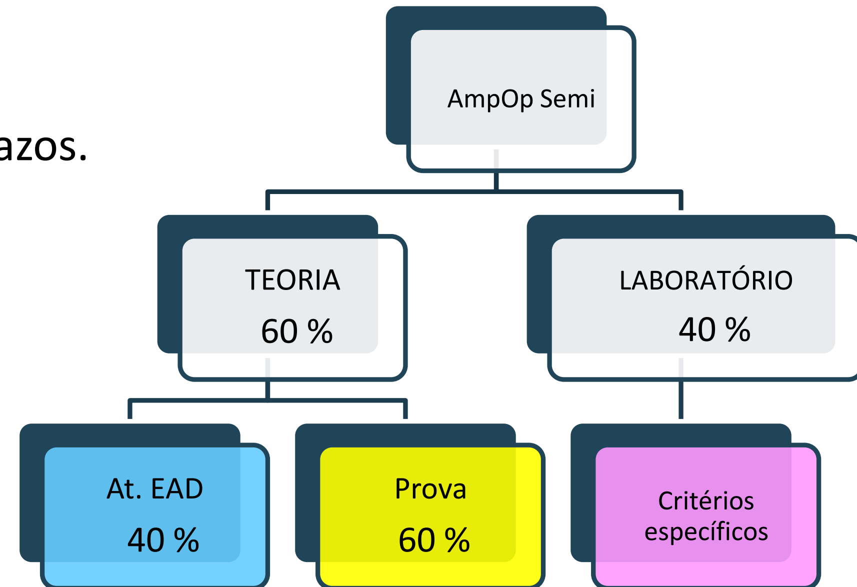
Detalhamento da avaliação da **teoria**

Atividades EAD 40 %
- ✓ Questionários,
- ✓ Projetos eletrônicos
- ✓ Simulações

→ Entrega nos prazos.

Provas 60 % - presenciais
- ✓ Prova 1 em 06 nov
- ✓ Prova 2 em 18 dez
- ✓ Prova 3 em 19 fev

→ Com consulta



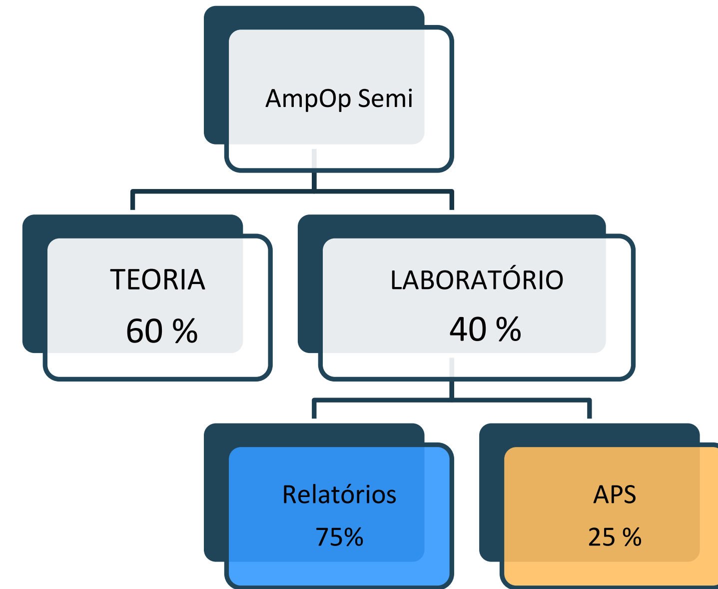
Substitutiva em 26 fev.
Substitui a menor nota
da prova.

→ Todo o conteúdo
Com consulta

Nota Teoria = ((P1+P2 +P3)/3)(0,6) + MédiaAt AtEAD(0,4)

Nota final da disciplina = NT.0,6 + Laboratório.0,4

Detalhamento da avaliação do **laboratório**



Relatórios:
- ✓ Individuais
- ✓ Respostas no próprio roteiro, caso falte espaço, grampear folha pautada com as suas respostas
- ✓ Respostas das perguntas, solução de exercícios iguais/semelhantes terão a nota anulada!
- ✓ Entrega na semana seguinte a da realização da prática

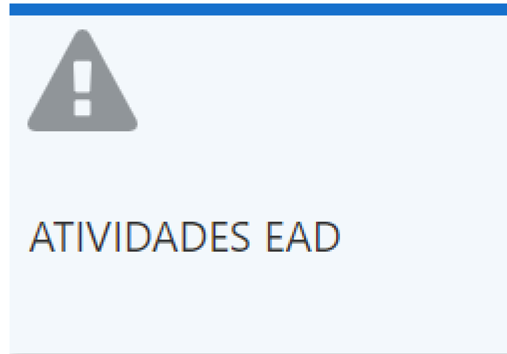
APS:
- ✓ Construção de fonte de alimentação
- ✓ Atividade que poderá ser individual ou em equipe de 2 estudantes
- ✓ Em breve será melhor detalhada

Nota Laboratório = ((Média relatórios)(0,75) + Nota APS(0,25)

Nota final da disciplina = NT.0,6 + Laboratório.0,4

Bloco das **ATIVIDADES EAD**

Fique atento para que as tarefas sejam enviadas no prazo correto e confirme se a tarefa foi enviada!



AtEad01: questionário sobre física dos semicondutores

Aberto: terça-feira, 1 out. 2024, 12:00
Fecha: sexta-feira, 11 out. 2024, 23:59



Responda corretamente às questões propostas.
Serão permitias duas tentativas cada uma com 100 min de duração.
A nota do questionário será a nota mais alta das 2 tentativas.
Observe a data limite.

Mensagens via Moodle & WhatsApp



Os avisos, mensagens, notificações serão enviados para o e-mail cadastrado na base de dados da UTFPR (estudante@utfpr.edu.br), portanto estabeleça na sua rotina consultar os seus e-mails para estar em dia com os acontecimentos.

Grupo no WhatsApp, solicito que ingressem através do link:
https://chat.whatsapp.com/B5nHvKwN1Ed4f67jrdzYXE
A proposta deste grupo é para tratar de eventualidades da disciplina, dúvidas e avisos emergenciais.

Permanências para atendimento➔ no LABORATÓRIO CA011

Atendimento no laboratório:
5ªs feiras das 14 h – 17 h

LAB00A: PROCEDIMENTOS E CONDUTAS PARA O DESENVOLVIMENTO DAS ATIVIDADES DO LABORATÓRIO
em https://youtu.be/xAwoVKMM6SU

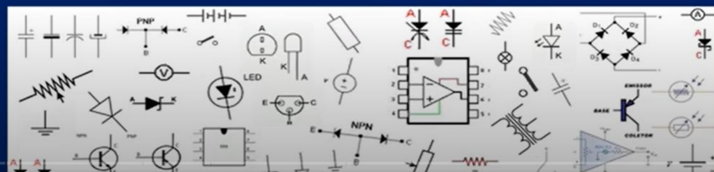
LAB00B: ORIENTAÇÕES SOBRE MANUSEIO DE EQUIPAMENTOS
Em https://youtu.be/FaWdP-jZhBA

HORÁRIO DO 2º SEMESTRE DE 2024

2º sem 2024	2ª f	3ª f	4ª f	5ª f	6ª f
M1	ELT74E - TEO		ELT74E - TEO	ELT74E - LAB	
7:30-8:20	CE202		CE107	S25-CA011	
M2	ELT74E - TEO		ELT74E - TEO	ELT74E - LAB	
8:20-9:10	CE203		CE107	S25-CA011	
M3		ELT74E - TEO	ELT74E - LAB	Paluno	
9:10-10:00		CE203	S24-CA011	CA011	
M4		ELT74E - TEO	ELT74E - LAB		
10:20-11:10		CE203	S24-CA011		
M5		ELT74E - LAB			
11:10-12:00		S26-CA011			
M6		ELT74E - LAB			
12:00-12:50		S26-CA011			
T1					
13:00-13:50					
T2	Manutenção			Paluno	
14:00:00-15 :00	Ensino			CA011	
T3	Manutenção			Paluno	
15:00 - 16:00	Ensino			CA011	
T4	Manutenção			Paluno	
16:00-17:00	Ensino			CA011	

LAB00B: ORIENTAÇÕES SOBRE MANUSEIO EQUIPAMENTOS

ORIENTAÇÕES PARA MANUSEIO DOS EQUIPAMENTOS

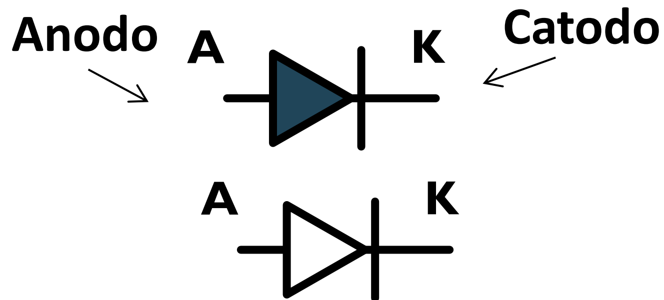


OPERAÇÃO *ELEMENTAR* DO DIODO



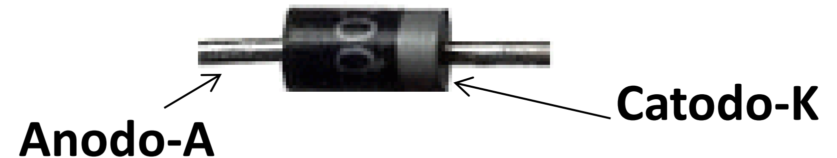
Diodo Semicondutor

Símbolo



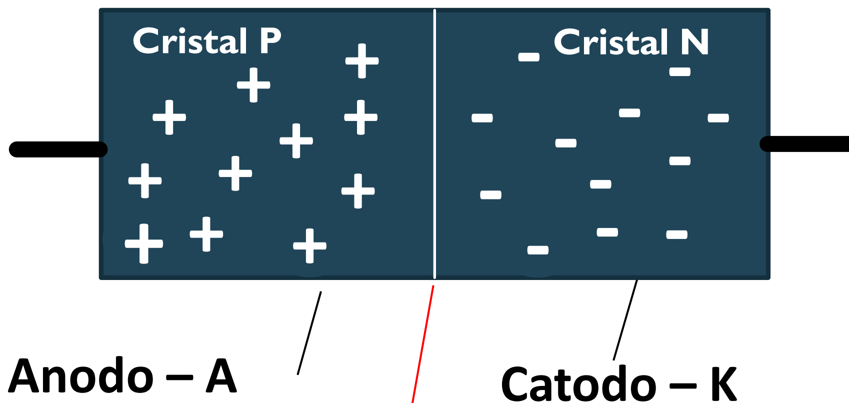
Silício ou Germânio

Encapsulamento: componente prático





Estrutura interna simplificada

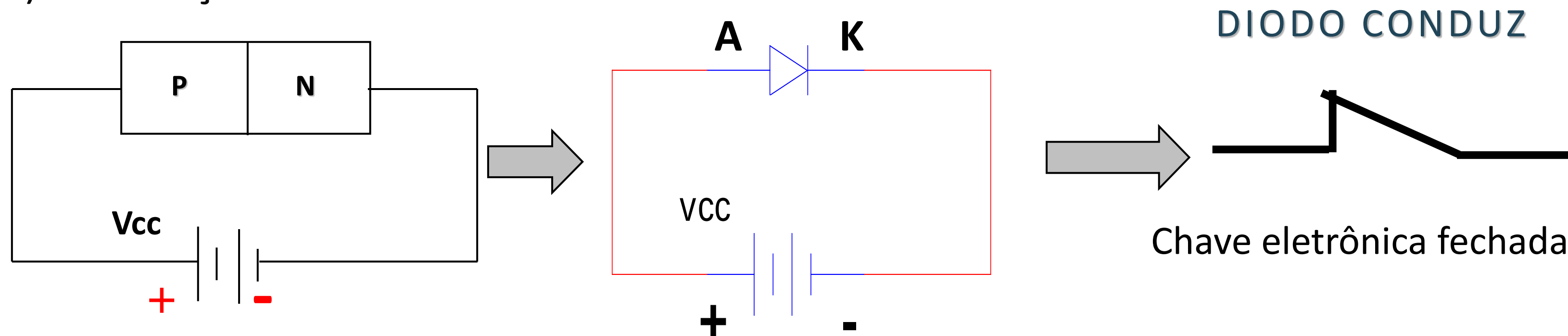


Junção PN

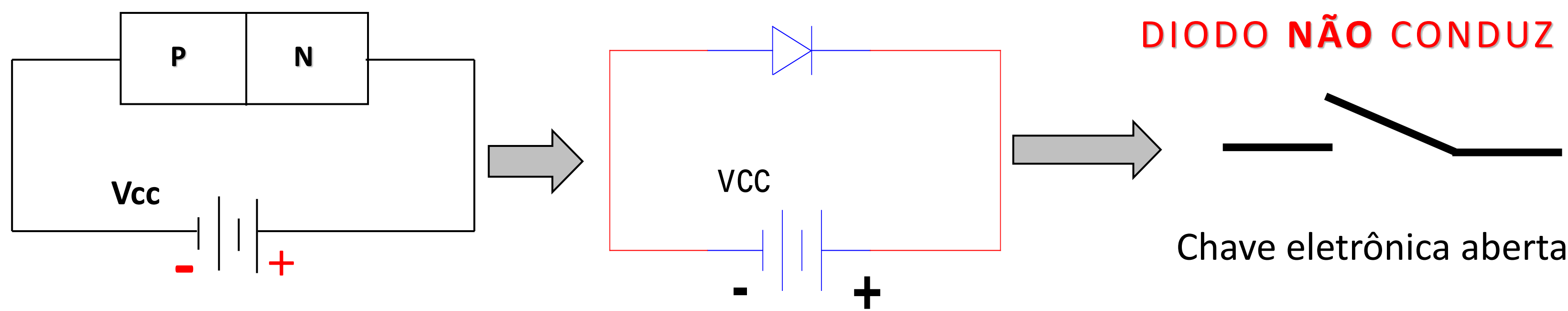
Diodo semicondutor: operação **ideal** em Corrente Contínua

Componente eletrônico não linear, polarizado.
Sua operação depende da polaridade da fonte de alimentação.
Atua como uma chave eletrônica, desde que adequadamente polarizado, permitindo que a corrente **circule em apenas um sentido** no circuito elétrico.

a) Polarização Direta



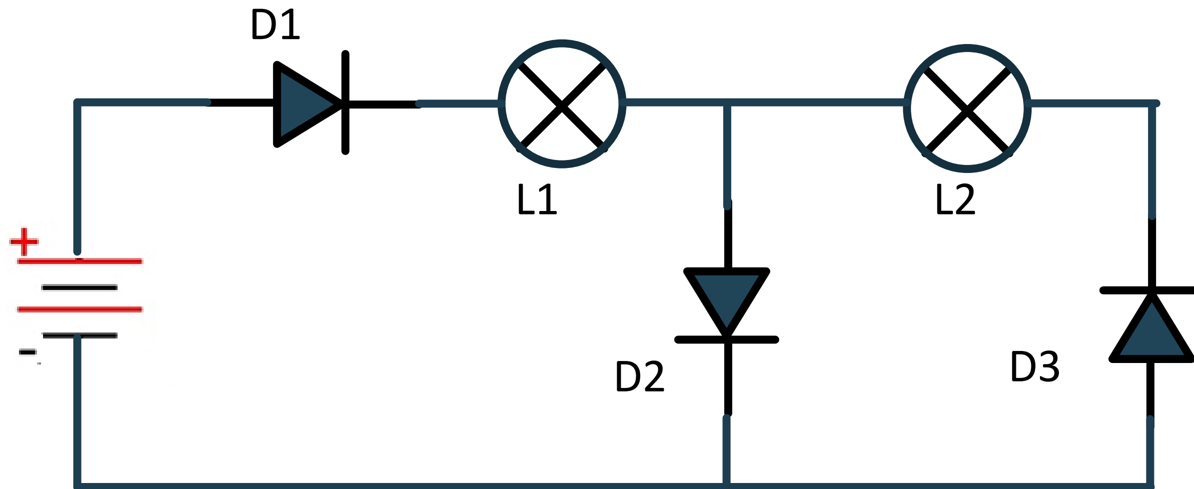
b) Polarização Reversa (Inversa)



Operação do diodo ideal

Quais lâmpadas acenderão? Admitir diodo ideal.

a)



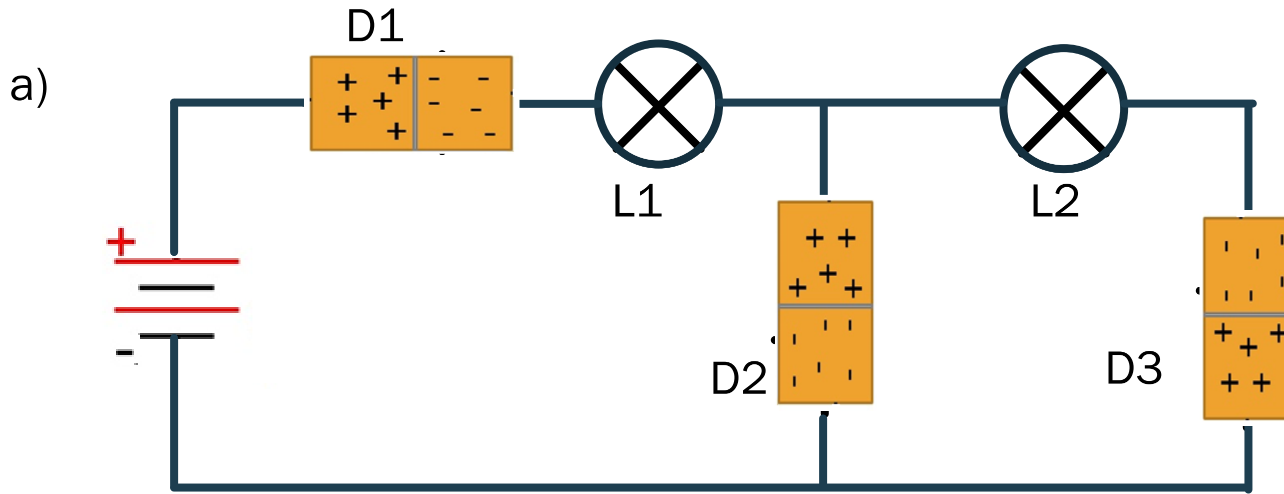
1º) Análise de cada diodo individualmente;

2º) Verifica como o diodo está polarizado:

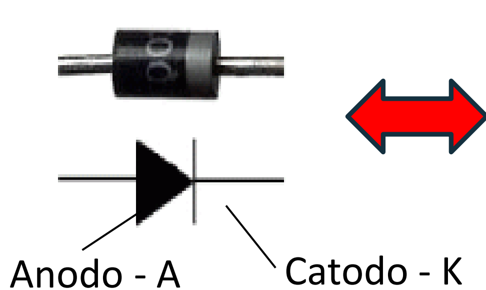
Direta → chave eletrônica fechada

Reversa (Inversa) → chave eletrônica aberta

Análise do exemplo “a”



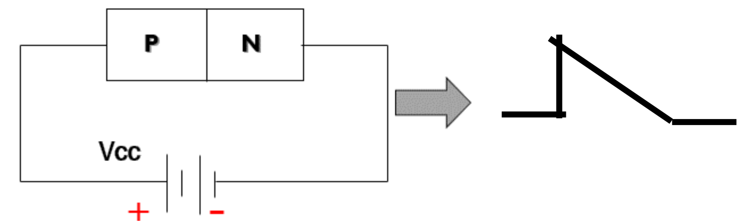
Para a análise preliminar do tipo da polarização, considerar:



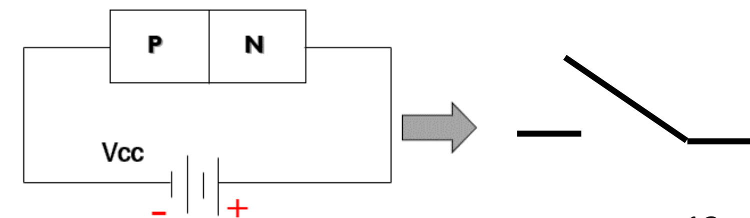
Anodo - A

Catodo - K

a) Polarização Direta

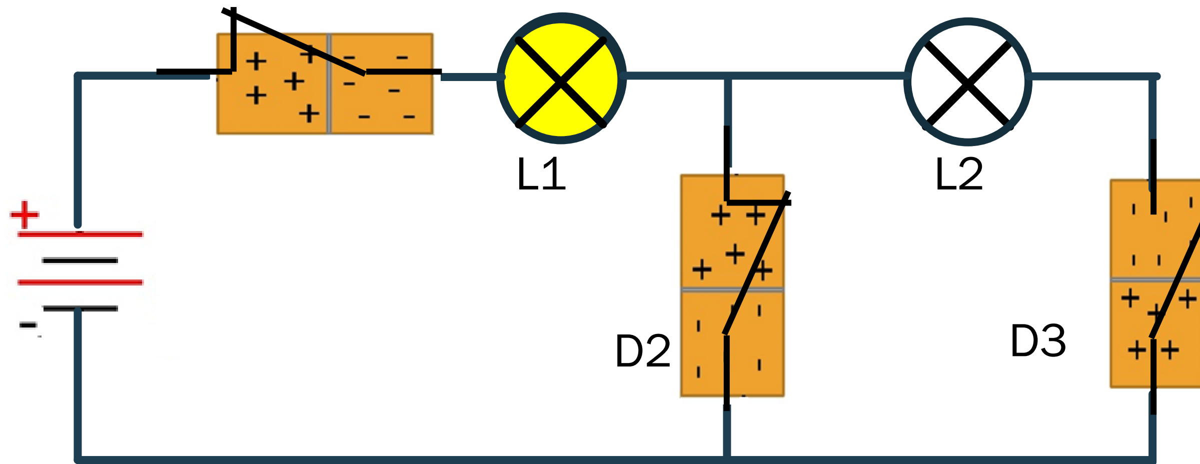


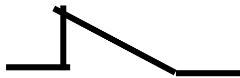
b) Polarização Reversa (Inversa)

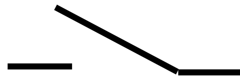


Análise do exemplo “a”

a)

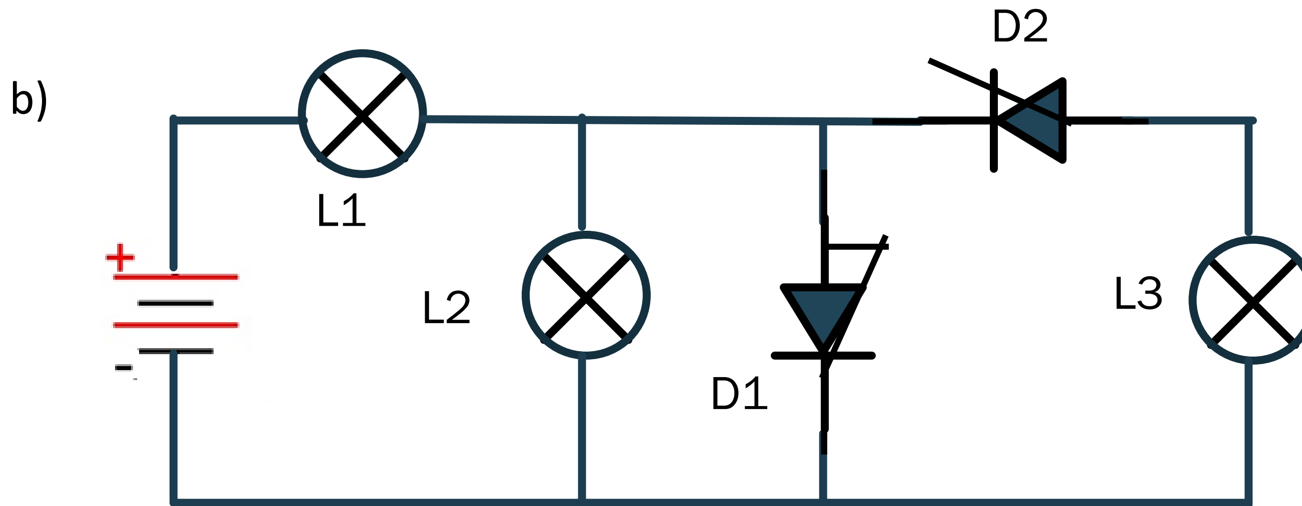


Direta➔ 

Reversa ➔ 

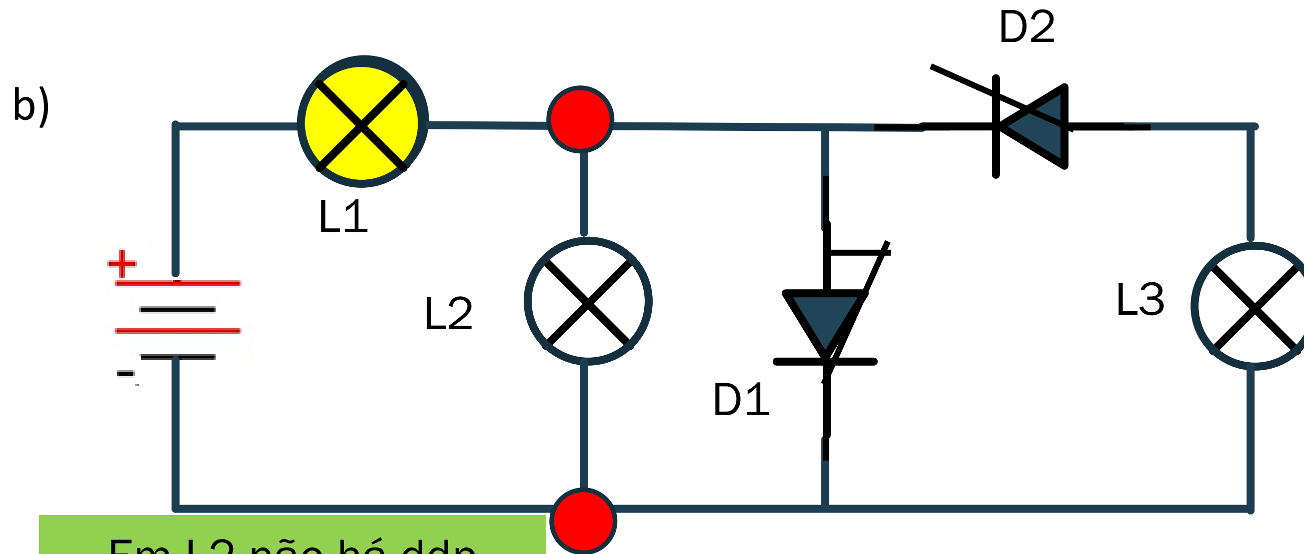
Exemplo “b”

Qual(ais) lâmpada(s) acende(m)?

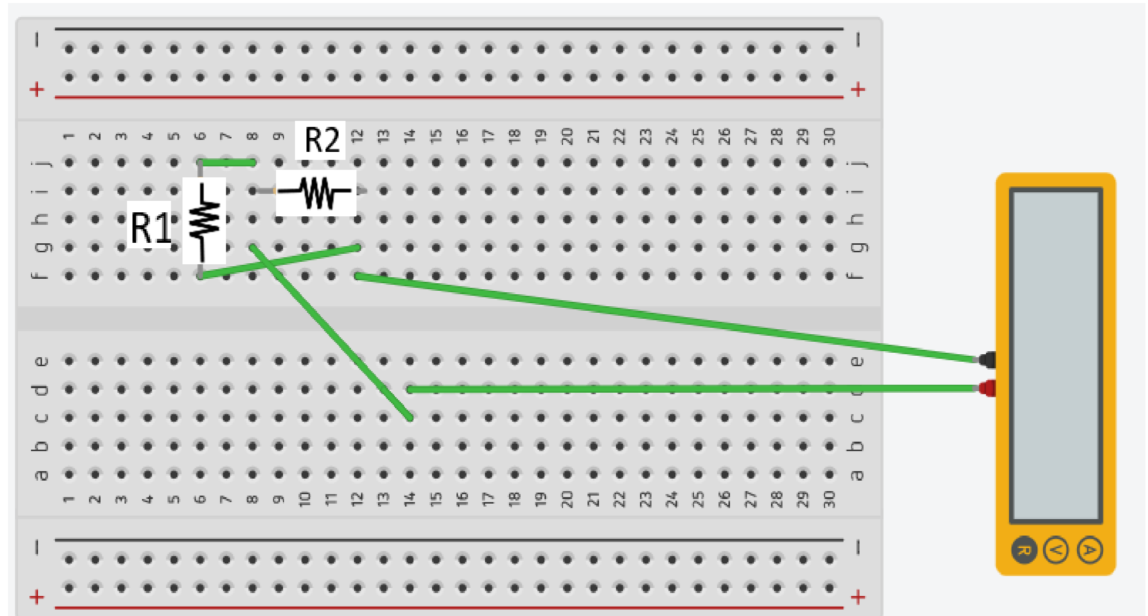


Exemplo “b”

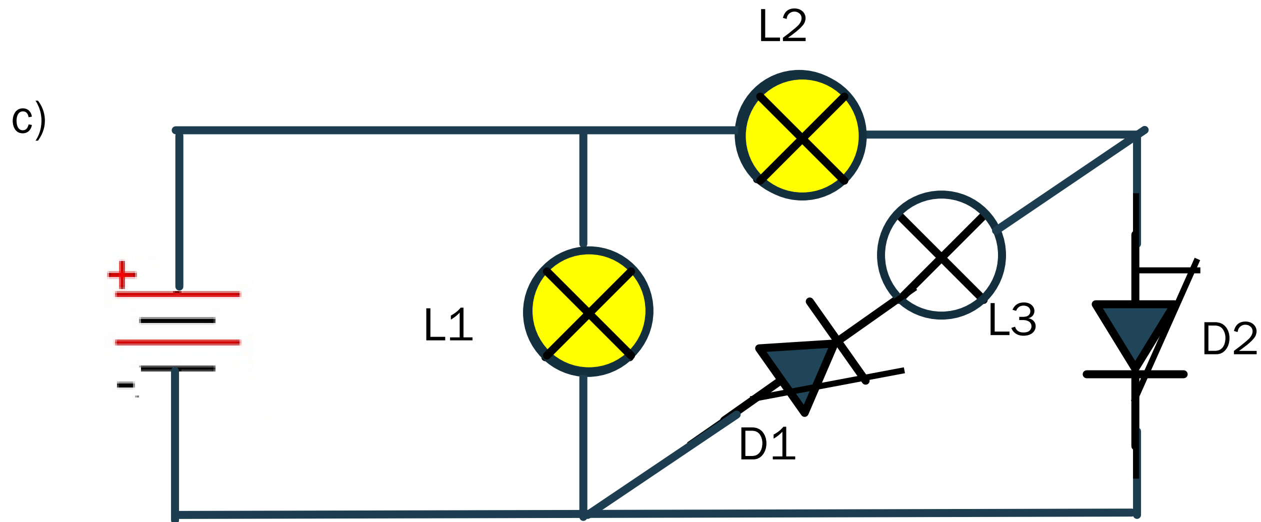
b)



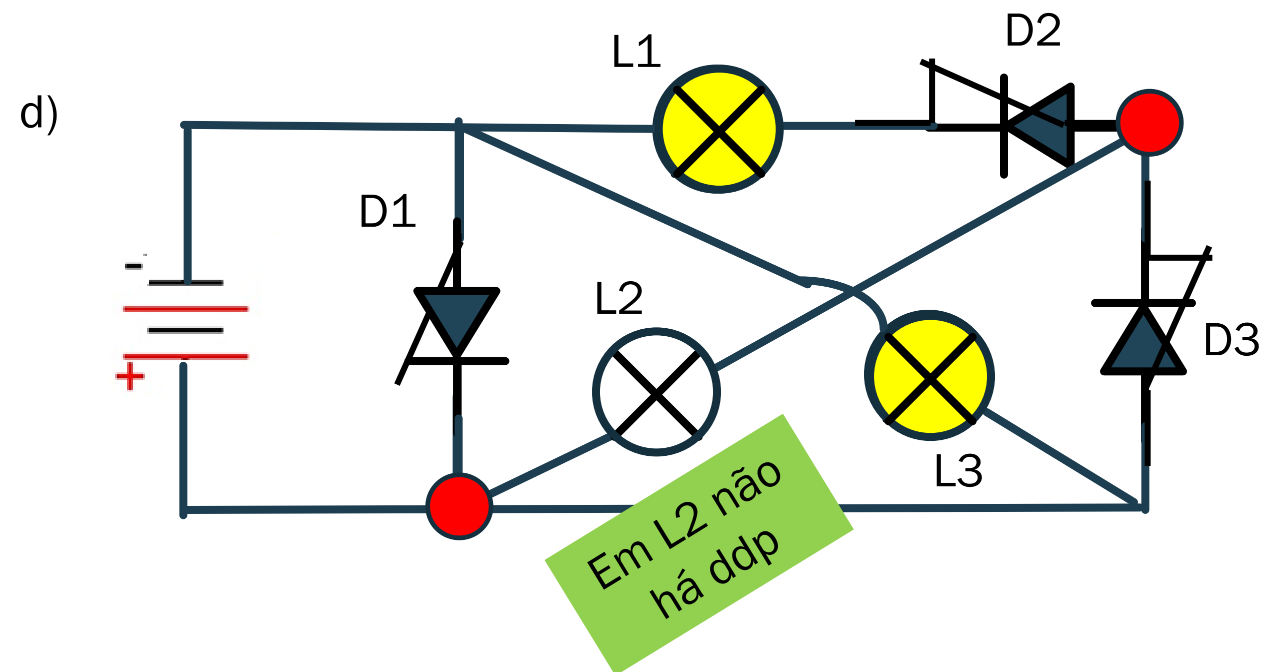
Em L2 não há ddp



Exemplo "c"



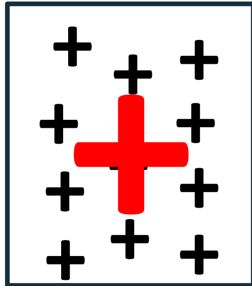
EXEMPLO "d"

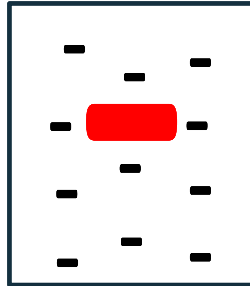


Potencial "+" & "−"

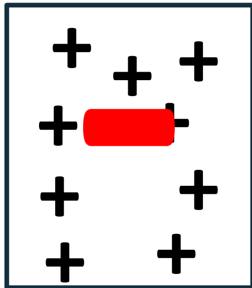
Corpo A | Corpo B

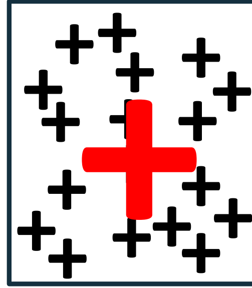
a)



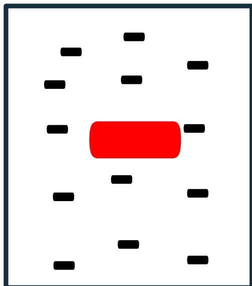


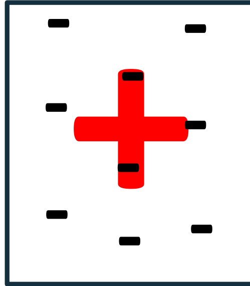
b)





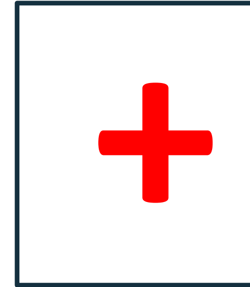
c)

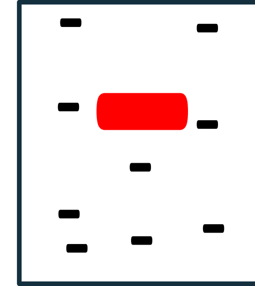




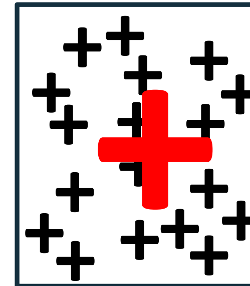
Corpo A | Corpo B

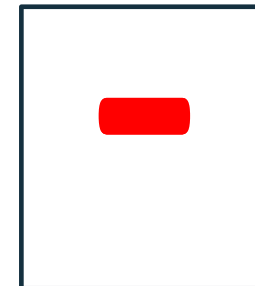
d)





e)





Como que o diodo está polarizado? **D**iretamente ou **R**eversamente

20 V D1 R 14 V
R

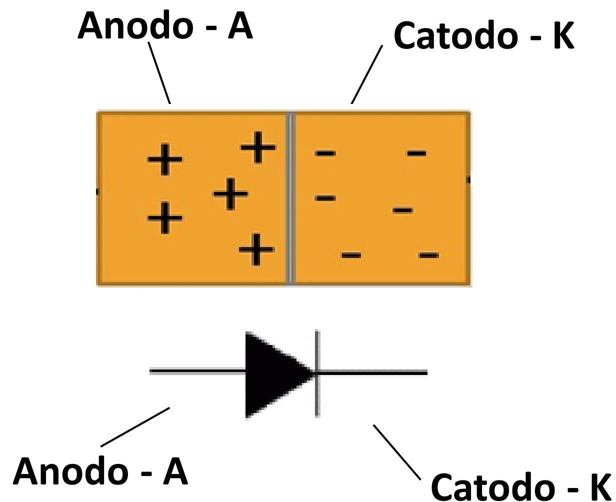
R D2 -6 V
D

D 18 V
6 V D5

R 10 V
R
-6 V D3

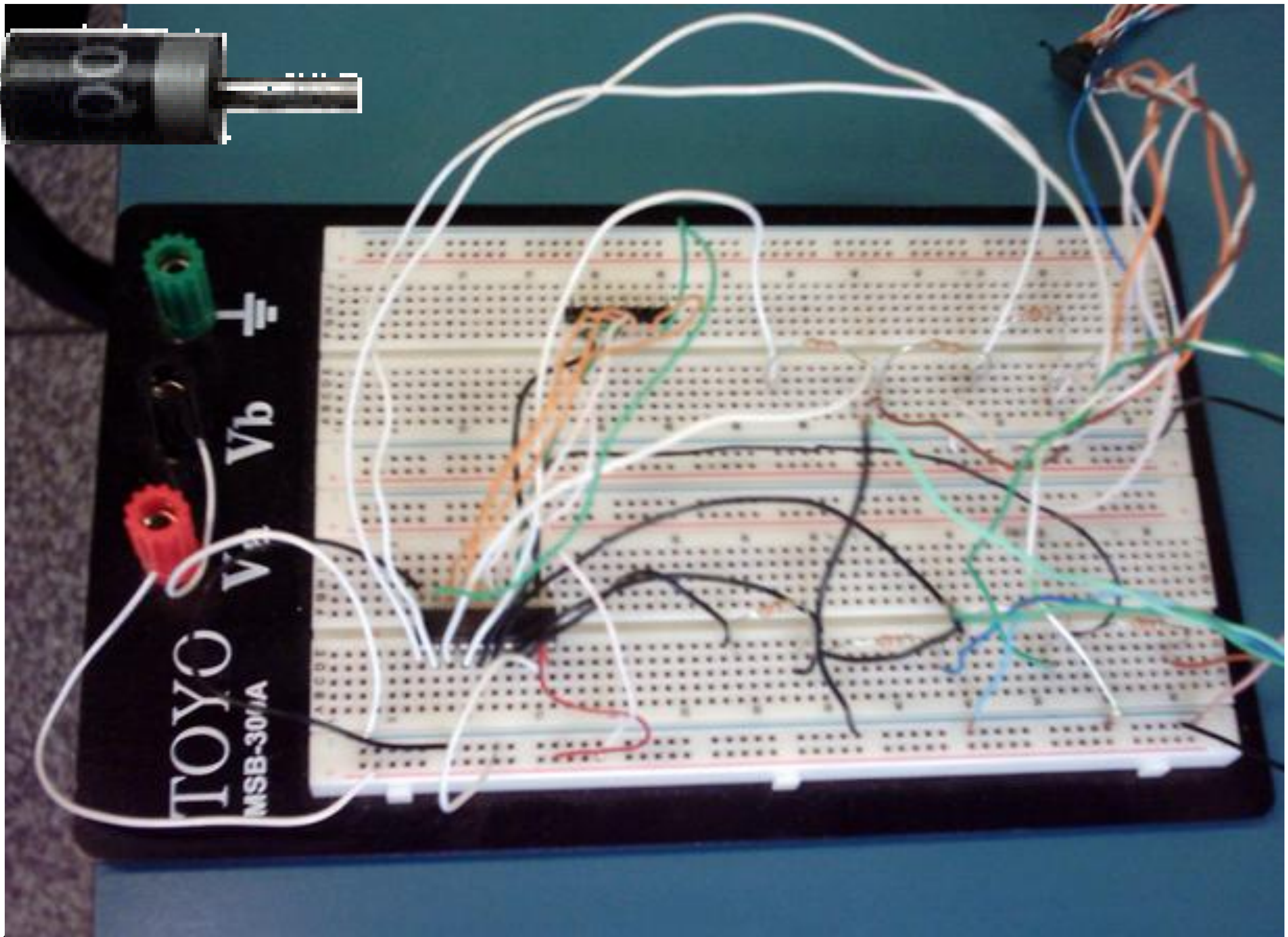
10 V R D6
R

D 3 V R D4 -7 V



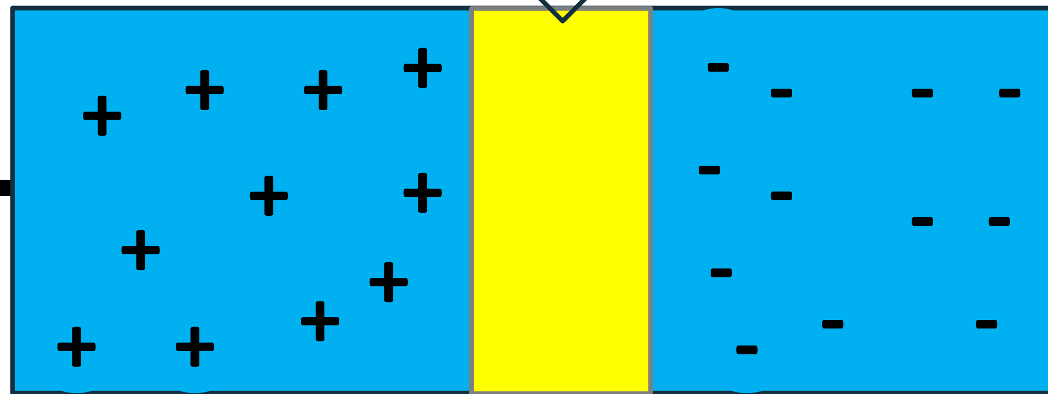
OPERAÇÃO *REAL* DO DIODO

Comportamento do diodo **real**



Comportamento do diodo **real** sem polarização

CAMADA (REGIÃO) DE DEPLEÇÃO: região desprovida de portadores MÓVEIS de eletricidade



Cristal P **Cristal N**

Não há fonte de tensão

A união dos cristais dá origem a junção PN.

Nas proximidades ocorre o processo de recombinação que forma a camada de depleção com um potencial elétrico de Vj volts.

O valor teórico:

Si → Vj = 0,7 V

Ge → Vj = 0,3 V

*O valor da tensão da camada de depleção é um valor que na prática poderá variar:

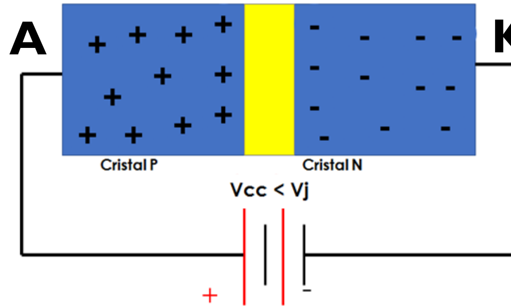
0,5 V < Si < 0,7 V

0,2 V < Ge < 0,3 V

Comportamento do diodo **real** em polarização direta

A)

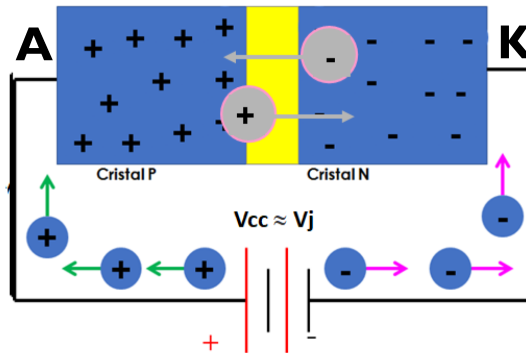
Vcc < Vj



O potencial de Vcc (V_{AK}) força o deslocamento de portadores para o interior de cada cristal.
Porém, como o potencial de Vcc é inferior a Vj, este não ultrapassa o potencial previamente formado pela camada de depleção.
Portanto não há circulação de corrente capaz de realizar trabalho.

B)

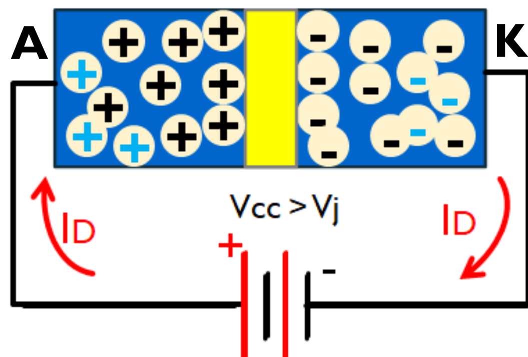
Vcc ≈ Vj



A tensão da fonte Vcc (V_{AK}) com potencial próximo ao valor de Vj é capaz de movimentar os portadores através da camada de depleção. Esta movimentação de portadores de carga elétrica é discreta o que resulta em uma **corrente direta desprezível**. O componente está na iminência da condução.

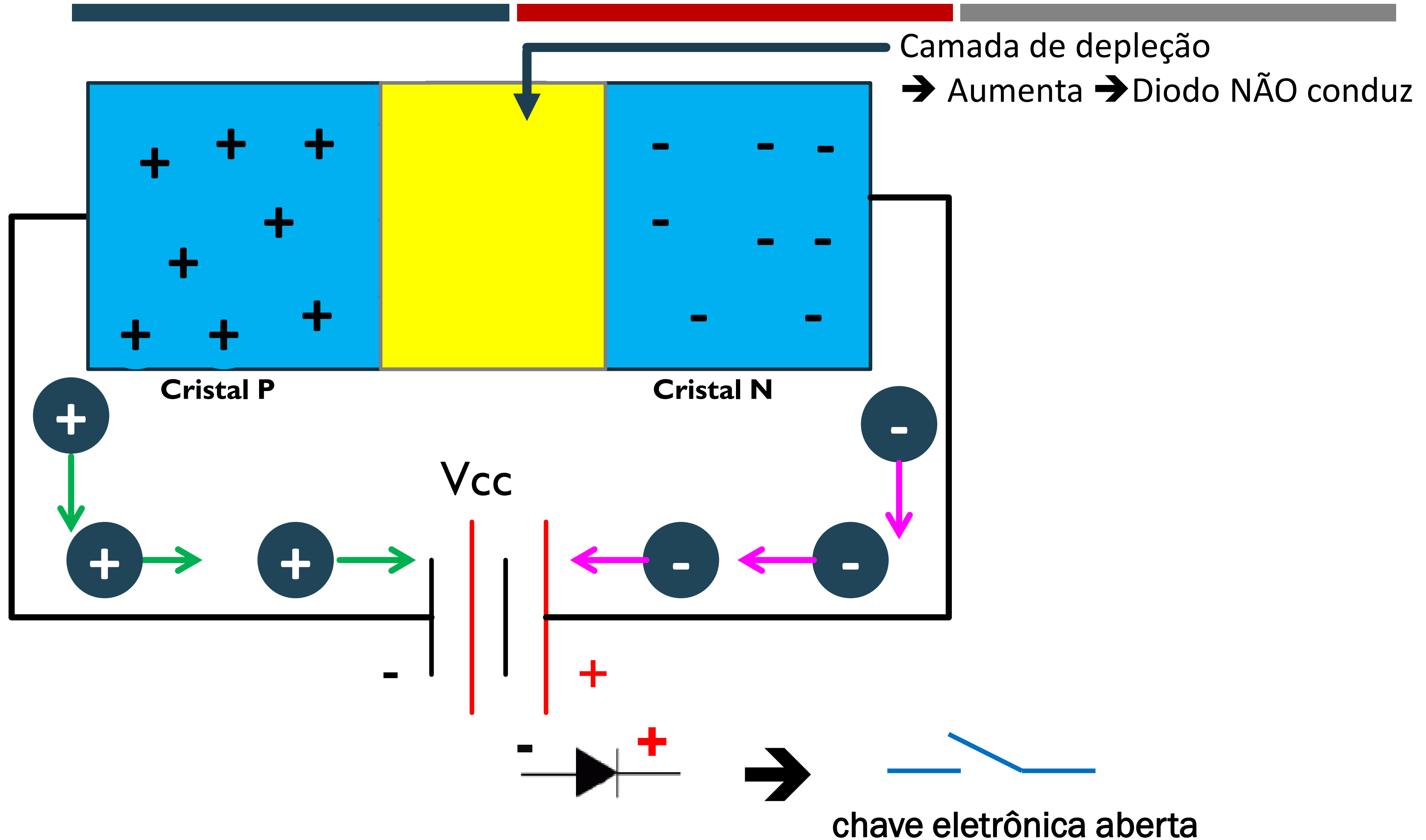
C)

Vcc > Vj



O aumento do potencial de Vcc (V_{AK}) força o deslocamento de portadores para o interior de cada cristal, que por sua vez, Aumenta a quantidade de portadores no interior do cristal. Por consequência, há o aumento do campo elétrico entre os cristais a tal ponto de que a camada de depleção é vencida a partir de um potencial denominado tensão de limiar (V_{γ}), joelho (Vj), de *threshold* (V_{TH}), direta ou *foward* (V_F)

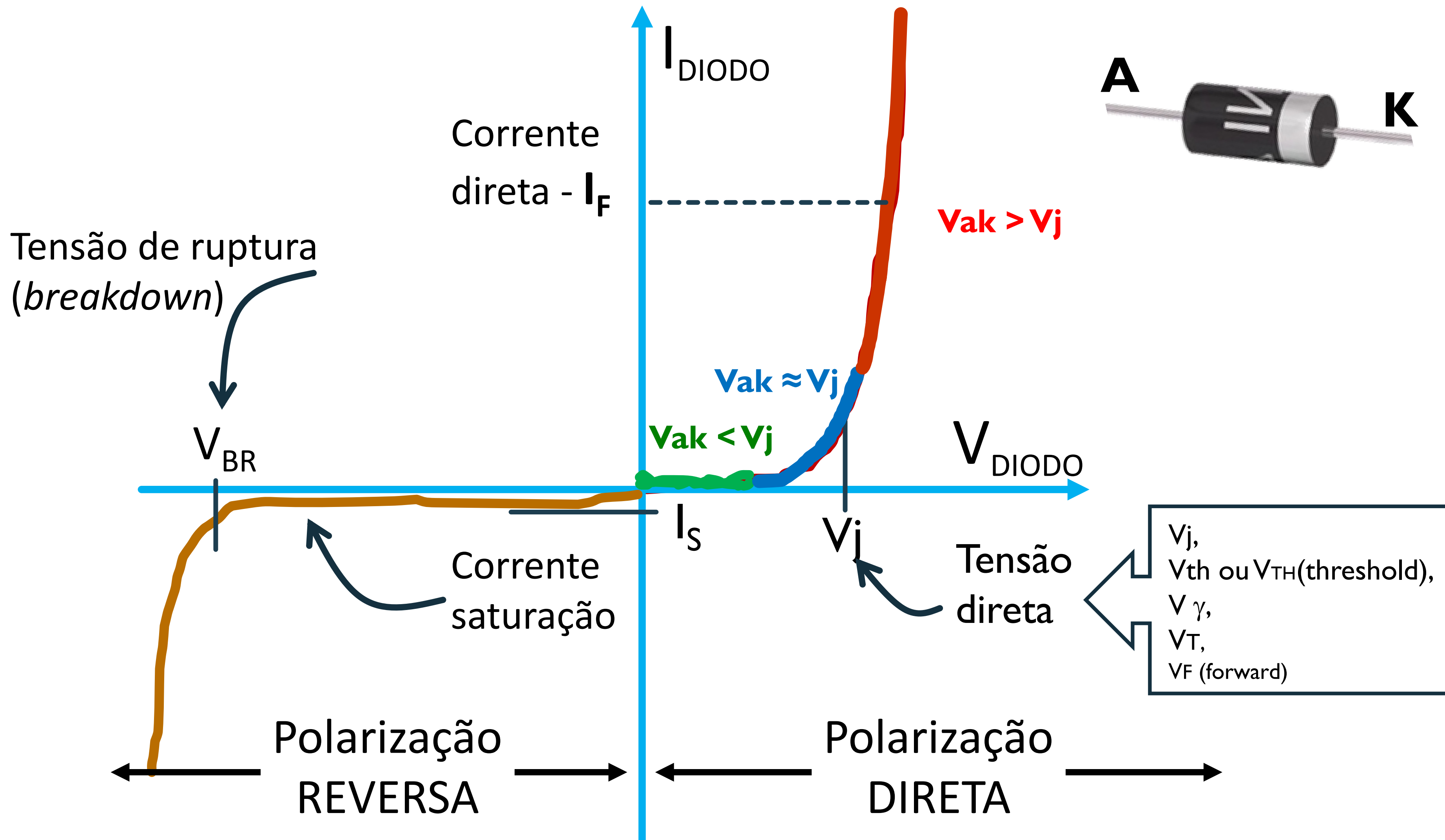
Comportamento do diodo **real** em polarização reversa ou inversa



Explicação detalhada no vídeo Como ativar ou não ativar um diodo no instante 10'

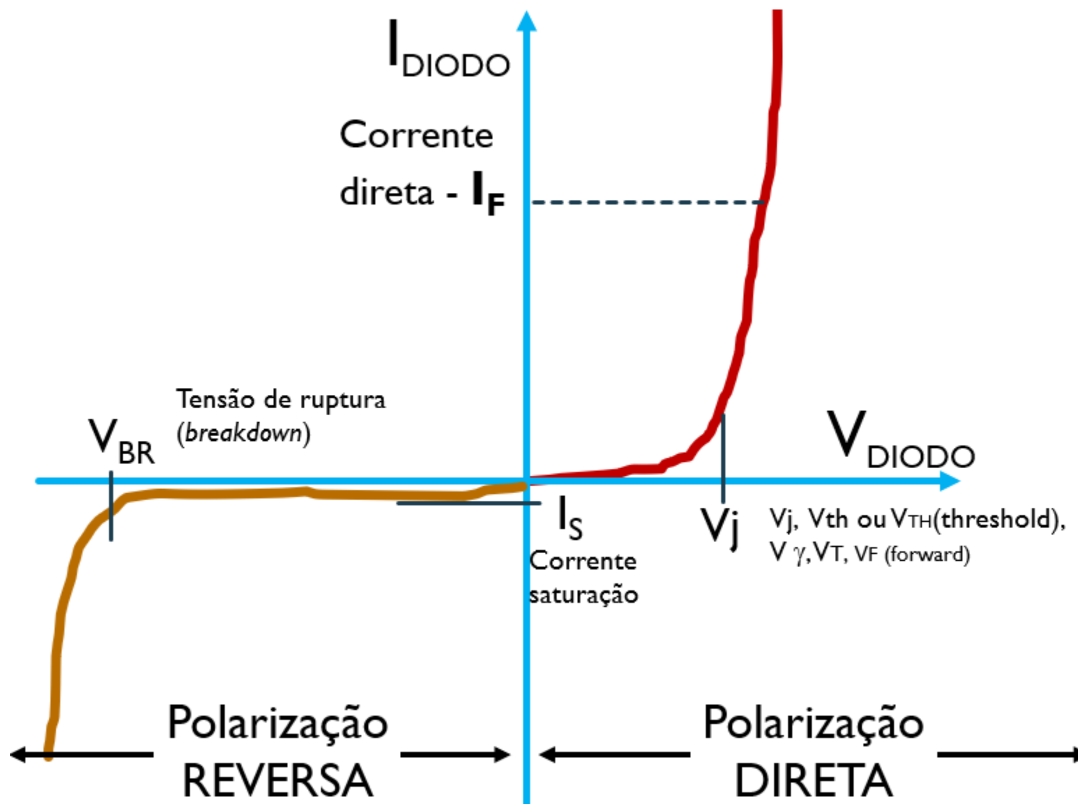
Curva característica: descreve o comportamento do diodo real

$$I_{diodo} = f\ (V_{diodo})$$



Curva característica: descreve o comportamento do diodo real

$$I_{diodo} = f\,(V_{diodo})$$



MODELO MATEMÁTICO

$$I_D = I_S\left(e^{\frac{V_D}{\eta V_T}} - 1\right)$$

No modelo matemático são incluídas informações sobre:

-temperatura de operação (V_T);

-nível de dopagem (η);

-detalhamento do comportamento da tensão e corrente na região do joelho.

Modelo matemático do diodo (junção PN)

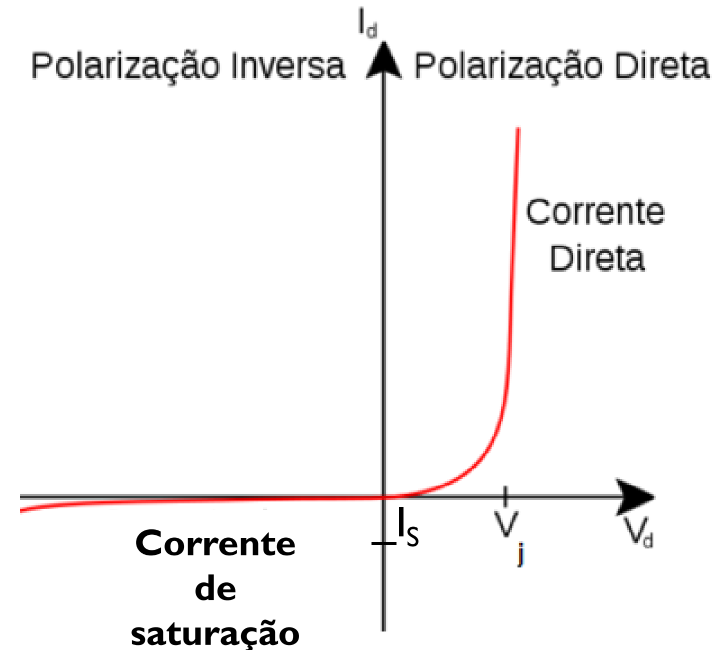
$$I_D = I_S\left(e^{\frac{V_D}{\eta V_T}} - 1\right)$$

Onde:

- I_D = corrente no diodo (A)
- I_S = corrente de saturação (A)
- V_D = tensão no diodo (V)
  - + ➔ pol. direta
  - - ➔ pol. reversa
- η= coeficiente de emissão.

Função de V_D que também depende do material: $1 \leq \eta \leq 2$.

- V_T = tensão térmica (V).



Tensão térmica: $$V_T = \frac{kT}{q}$$

Onde:

k = constante de Boltzmann = $1{,}38\text{x}10^{-23}$ J/K.

T = temperatura absoluta em K (273 ºC + ºC)

q = carga elétrica do ***é*** = $1{,}6\text{x}10^{-19}$ C.

Para a temperatura de 20 ºC o valor de V_T = 25,27 mV.
O valor típico de V_T = 25 mV ou 26 mV nos cálculos onde é requerido este parâmetro.

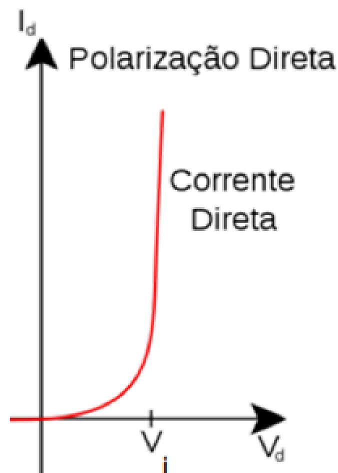
Aproximações da equação da junção PN

$$I_D = I_S(e^{\frac{V_D}{\eta V_T}} - 1)$$

REGIÃO DIRETA

Como a corrente I_S apresenta pequena intensidade o que possibilita ser desprezada; temos que na REGIÃO DIRETA a corrente no diodo (junção) pode ser aproximada para:

$$I_D = I_S.(e^{\frac{V_D}{\eta V_T}})$$



REGIÃO REVERSA

O valor de V_D na equação deve ser considerado **negativo !**

Quando não houver rigor nos cálculos, o valor da corrente no diodo pode ser aproximada para:

$$I_D = -I_S$$



Efeito da temperatura na corrente do diodo

A temperatura interfere na intensidade da corrente através da:

$$I_D = I_S\left(e^{\frac{V_D}{\eta V_T}} - 1\right)$$

* Corrente de saturação (I_S)

"I_S" é afetada pela temperatura porque fornece energia para a estrutura cristalina, que favorece o aparecimento de portadores. Sendo esse efeito mais intenso é sobre os portadores **minoritários**, ou seja, sobre "I_S".

Uma **regra prática**, geralmente aplicada é aplicar a relação de que I_S **dobra** de valor a cada 10 ºC de aumento na temperatura.

*Tensão térmica (V_T)

$$V_T = \frac{kT}{q}$$

Onde:

k = constante de Boltzmann = $1{,}38\times10^{-23}$ J/K.

T = temperatura absoluta em K (273 ºC + ºC)

q = carga elétrica do ***é*** = $1{,}6\times10^{-19}$ C.

Admite-se o valor típico de V_T = 25 mV ou 26 mV quando opera na temperatura ambiente, entre 20 ºC ~ 25 º C.

Efeito da temperatura na corrente do diodo

- Corrente de saturação (I_S)
- Tensão térmica (V_T)

$$I_D = I_S\left(e^{\frac{V_D}{\eta V_T}} - 1\right)$$

-75°C
25° C
200 °C

I_D (mA)
(392°F) 200°C
100°C
25°C
(–103°F) –75°C
12
10
8
6
4
2
(ponto de ebulição da água)
(temperatura ambiente)
(V)
60 50 40 30 20 10
0,7 1 1,5 2
V_D (V)
1
2
3
(μA)

Créditos:
BOYLESTAD, Robert L.; NASHELSKY, Louis. Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos. Prentice-Hall do Brasil, 1984. Cap. 1, fig 1.24.



Exercício

1) Um diodo de Si apresenta uma corrente de saturação igual a 0,1 pA a 20 ºC.

a) Calcule a corrente quando for polarizado diretamente com 0,55 V.
b) Calcule a corrente no mesmo diodo para 100 ºC.
c) Aumento percentual da corrente de 20 ºC a 100 ºC

a.i) Usando a eq. da tensão térmica para T = 20 ºC:

$$V_T = \frac{kT}{q} = \frac{(1{,}38.10^{-23})(273 + 20)}{1{,}6.10^{-19}} = 0{,}02527 = 25{,}27\ mV$$

a.ii) Usando a eq. completa da junção PN:

$$I_D = I_S(e^{\frac{V_D}{\eta V_T}} - 1)$$

Admitir η = 1 quando não informado

$$I_D = 1.10^{-13}(e^{\frac{0{,}55}{(1)(0{,}02527)}} - 1)$$
$$I_D = 0{,}283\ mA$$

Exercício

b) Para T = 100 ºC:

b.1) Cálculo de V_T:

$$V_T = \frac{kT}{q} = \frac{(1{,}38.10^{-23})(273+100)}{1{,}6.10^{-19}} = 0{,}03217V = 32{,}17\ mV$$

b.ii) Ao variar a T de 20 ºC para 100 ºC, houve um incremento de 10 ºC para cada (100º-20º) =80º, ou seja, a corrente I_S dobra a cada 80º/10º = 8 vezes.

O fator a ser aplicado: 2^8 = 256 no aumento da corrente I_S .

Logo a 100ºC ➔ I_S =(0,1.10^{-12})(256) =256.10^{-13} A.

b.iii) A corrente no diodo para T = 100 ºC, considerando a corrente Is para a temperatura em questão:

$$I_D = 256.10^{-13}\left(e^{\frac{0{,}55}{(1)(0{,}03217)}}-1\right)$$
$$I_D = 0{,}681\ mA$$

c) O valor da corrente o diodo aumenta de:

↑% = 0,681 m/0,283 m= 240%

Exercícios

2) Um diodo de Si com η=1 tem V=0,7 V e I = 1 mA. Calcule o potencial em seus terminais para I=0,1 mA e 10 mA.

Vt= 25 mV: Para 0,1 mA → 0,6425 V e para 10 mA → 0,7575 V.

Vt= 26 mV: Para 0,1 mA → 640,133 mV e para 10 mA → 759,867 mV.

Solução completa em https://youtu.be/Pf1LJh1sDsc

3) Usando o fato de um diodo de Si com tem I_S= 10^{-14} A à 25 °C e que Is aumenta em 15 % por °C de aumento de temperatura, calcule o valor de I_S a 125 ºC.

Aumento de 15 % → 1,15

ΔT = 125°-25°=100

I_S em 125°C = $(10^{-14}).(1,15)^{100}$ = $1,1743 \times 10^{-8}$ A

4) Um diodo de Si, tem uma corrente de 1pA. Usando os valores de η indicados a seguir e supondo que Ta=25 °C, calcule a corrente no diodo quando: (Bogart, ex. 2.8)

a) Polarizado reversamente em 0,1 V e η=2 . R: -0,857 pA

b) Polarizado reversamente em 1 V e η=2 . R: -1 pA

c) Anodo e catodo em curto e η=2 . R: 0

d) Polarizado diretamente com V=0,5 V e η=1 . R: 0,224 mA

e) Polarizado diretamente com V=0,7 V e η=1 . R: 0,492 A

Exercício 2

2) Um diodo de Si com η=1 tem V=0,7 V e I = 1 mA. Calcule o potencial em seus terminais para I=0,1 mA e 10 mA.

Vt= 25 mV: Para 0,1 mA➔0,6425 V e para 10 mA ➔0,7575 V.

Vt= 26 mV: Para 0,1 mA➔640,133 mV e para 10 mA ➔759,867 mV.

$$I_D = I_S(e^{\frac{V_D}{\eta V_T}} - 1)$$

Resultados intermediários para Vt = 25 mV e ID =0,1 mA:

Is = $691{,}44.10^{-18}$ A

I_D/Is = $144{,}626.10^{9}$

ln ($144{,}626.10^{9}$)=25,6974

Exercício 3

3) Para uma dada operação em que VF =0,23 V, o diodo de Si apresenta I_S = 10^-14^ A em 25 ºC. A característica deste modelo de componente é e que I_S aumenta em 15 % por ºC de aumento de temperatura. Calcule a I_D em 125 ºC.

a) I_S na nova temperatura= 125 ºC:

Aumento de 15 % ➔1,15

$V_T = \Delta T = 125\,° - 25\,° = 100\,°C$

I_S em 125ºC = $(10^{-14})(1{,}15)^{100}$

$I_{S_{125°}} = 11{,}743.10^{-9}\,A$

b) V_T na nova temperatura = 125 ºC:

$$V_T = \frac{kT}{q} = \frac{(1{,}38.10^{-23})(273+125)}{1{,}6.10^{-19}}$$

$$V_T = (86{,}25.10^{-6})(398)$$

$$V_{T_{125°}} = 34{,}33\,mV$$

c) I_D na nova temperatura = 125 ºC:

$$I_{D_125} = I_S\left(e^{\frac{V_D}{\eta V_T}}\right) \Rightarrow polarização\ direta$$

$$I_{D_{125°}} = 11{,}743.10^{-9}\left(e^{\frac{0{,}23}{34{,}33.10^{-3}}}\right)$$

$$I_{D_{125°}} = 11{,}743.10^{-9}(812{,}54)$$

$$I_{D_{125°}} = 9{,}54.10^{-6}\,A$$

Atividade EAD

Sugiro a visualização dos vídeos que contribuem muito no entendimento inicial do componente que estão no bloco REPOSITÓRIO DA DISCIPLINA EM
https://moodle.utfpr.edu.br/course/view.php?id=1823&section=1&singlesec=1#

Pode também escolher no canal do YT em que posto os meus vídeos, encontrará assuntos pertinentes tanto da teoria como da prática.
https://www.youtube.com/channel/UC07Ri3i6VglGDU6vAIqed

Vídeos IMPORTANTISSÍMOS para as duas primeiras aulas, que contempla a aula AOS01 e AOS02:

-Vídeo1: Detalhamento do processo de recombinação em
https://www.youtube.com/watch?v=qvY7tovhVfM&t=387s

-Vídeo2: Curva característica do diodo em https://www.youtube.com/watch?v=tPXvL9wQr9U&t=4s

-Vídeo3: Como ativar ou não ativar um diodo em https://www.youtube.com/watch?v=C2tlISJjnvM&t=762s

Além dos vídeos, proponho a leitura (uma rápida visualização) dos capítulos dos livros online sugeridos. Insisto que tente acessar os livros online porque é um recurso bem interessante!
-Leitura livro online: Malvino & Bates ONLINE
capítulo 3: Teoria dos diodos p.57. LIVRO ONLINE
https://moodle.utfpr.edu.br/course/view.php?id=1823&section=1&singlesec=1#